

融合多源探测资料的贵阳机场低空风切变识别与预报应用研究

杨凤婷

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年7月14日; 发布日期: 2026年7月21日

摘 要

低空风切变严重威胁飞行安全。文章利用欧洲中心ERA5 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 逐小时再分析资料、贵阳机场2021年12月~2026年4月话音方式航空器空中报告、自观资料、天气雷达资料、风廓线雷达资料及激光测风雷达资料, 对贵阳机场锋面、雷暴外流、动量下传、逆温等4种类型的风切变个例展开分析, 探讨监测识别和资料应用。结果表明: 冬末春初为低空风切变高发时段, 激光雷达对锋面型风切变有约30min预警时效, 自观和风廓线雷达对各类风切变的预警修订与解除有重要参考价值。构建“数值预报早期识别-天气雷达与地面自观短临修订-激光雷达临近预警-风廓线雷达全程监测”的递进式预报预警思路, 有助于提升风切变的识别与预警。

关键词

贵阳机场, 风切变, 多源数据, 激光雷达, 风廓线雷达

Research on the Application of Low Altitude Wind Shear Identification and Forecasting at Guiyang Airport by Integrating Multi Source Detection Data

Fengting Yang

Guizhou Sub-Bureau of Southwest Regional Air Traffic Administration of Civil Aviation of China, Guiyang
Guizhou

Received: May 25, 2026; accepted: July 14, 2026; published: July 21, 2026

Abstract

Low altitude wind shear poses a serious threat to flight safety. The article uses hourly reanalysis data of ERA5 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ from the European Center, aerial reports of voice based aircraft at Guiyang Airport from December 2021 to April 2022, observational data, weather radar data, wind profile radar data, and laser wind radar data to analyze four types of wind shear cases at Guiyang Airport, including frontal, thunderstorm outflow, momentum transfer, and inversion, and explore monitoring identification and data application. The results indicate that the late winter and early spring are high incidence periods for low altitude wind shear. Lidar has a warning time of about 30 minutes for frontal wind shear, and self observation and wind profile radar have important reference value for revising and lifting warnings for various types of wind shear. Constructing a progressive forecasting and early warning approach of “early identification of numerical forecasts-short-term revision of weather radar and ground observation-laser radar proximity warning-full monitoring of wind profile radar” can help improve the identification and early warning of wind shear.

Keywords

Guiyang Airport, Wind Shear, Multi-Source Data, LiDAR, Wind Profile Radar

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

国际民航组织(ICAO)将低空风切变定义为：地面以上 2000 英尺高度内风矢量或其分量在垂直方向或某一水平方向的改变[1]。低空风切变是公认的影响飞行安全的危险天气，当飞机在起飞着陆阶段遭遇低空风切变，空速会发生复杂的振荡，造成飞机俯仰、滚转、偏航等，使稳定性无法保持[2][3]，易造成飞行事故。因此，低空风切变受到民航运输部门的广泛关注。

然而，低空风切变具有尺度小、变化快、强度大等特点，监测和预警工作存在较大困难[4][5]，学者们对及时识别并预警低空风切变进行了大量研究。Hannon S M 和 Thomson J A L 等利用激光雷达数据对低空风切变开展了监测、湍流强度计算和飞机尾流特性分析工作，验证了激光雷达在航空气象应用中的可行性[6]。胡明宝等[7]的初步研究结果表明，将风廓线雷达探测的高空风场进行等值线分析，可直观展现风切变区域。赵文凯等[8]-[10]将现有测风方法进行对比后认为，多普勒天气雷达通过对径向速度的反演可得到大气风场情况，风廓线雷达对晴空条件下的风场探测效果较好，而激光测风雷达的多种探测模式在低空风切变的监测预警方面优势突出。若能通过有效的监测和预警手段，提前向航空气象用户提供低空风切变的关键信息，可最大限度降低安全风险[11]。所以，开展低空风切变的识别和预警研究不仅拥有理论支撑，还具备广泛的实际应用前景。

贵州地处云贵高原东麓，贵阳机场位于贵州省中部(106.8°E , 26.5°N)。基于大气环流形势的分析，本文利用贵阳机场接收的话音方式航空器空中报告，融合自动气象观测资料、多普勒天气雷达资料、风廓线雷达资料及激光测风雷达资料等，对机场发生的几次典型低空风切变事件展开分析，探讨综合利用多种产品和技术手段实现风切变的有效识别和提前预警，并针对现有业务工作中的不足提出改进方案，以期构建更加完善的风切变预报预警体系提供理论支持和技术参考，为相关研究提供新的思路 and 方向。

2. 资料与方法

2.1. 数据资料

(1) 贵阳机场双跑道运行投入使用以来, 2021 年 12 月~2026 年 4 月共接收到有关低空风切变的话音方式航空器空中报告 65 份, 报告包含时间、位置、风切变遭遇高度、航班号、机型等内容。

(2) 欧洲中心 ERA5 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 逐小时再分析资料, 用以分析大气环流背景场。

(3) 2021 年 12 月~2026 年 4 月贵阳机场自动气象观测资料、多普勒天气雷达探测资料、风廓线雷达探测资料; 2024 年 11 月~2026 年 4 月贵阳机场激光测风雷达探测资料。探测资料具备时间连续性, 数据质量稳定, 用以分析风切变的识别效果和预警功能。

2.2. 机场探测风设备介绍

目前贵阳机场拥有多种测风的探测设备和技术手段, 为风切变的识别和预警提供重要支撑。

机场在两条跑道处各部署了三套具备测风功能的地面自观系统, 分别位于跑道北端、中间端及南端, 能连续、自动探测离地 10 m 的每秒风向风速及阵风数据, 精度高, 为低空风切变的识别提供了基本参考。另外, 依托贵州省气象局部署的高密度地面自动气象站网, 可获得最快 2 min 更新一次的 10 m 风数据补充, 形成具备分钟级时效性捕捉地面风场的空间分布与演变特征的区域网络, 为地面形势的分析提供支撑。然而, 自观设备仅测量 10 m 左右高度的单点地面风, 空间代表性有限。

机场 C 波段双偏振多普勒天气雷达于 2015 年底投入使用, 常规探测距离 150 km, 波束宽度 0.5° , 空间分辨率较高。受机场周边地形复杂影响, 雷达电磁波传播受限, 导致基于速度-方位显示(VAD)技术反演的风垂直廓线产品常有数据缺失, 因此在实际业务中, 主要应用于降水、强对流天气的识别监测。

机场在跑道南端部署了一部 CFL-03 型大气边界层风廓线雷达并于 2019 年 1 月投入业务运行。其测风原理是雷达向空中发射电磁波, 接收并分析大气湍流对电磁波的散射回波, 进一步计算出不同高度层的风场情况。探测范围为测站上空 0~6 km, 真高 1200 m 以下垂直分辨率为 60 m, 1200 m 以上为 120 m, 时间分辨率为 6 min [12]。探测产品有风向风速、垂直速度、风切变等, 能直观、高频的监测机场单点上空水平风随高度的变化。但同样存在空间代表性不足的问题。

FC-III 相干多普勒测风激光雷达于 2024 年 11 月开始在机场试用。雷达向外发射红外激光脉冲, 通过计算大气气溶胶粒子对激光的反射情况, 对风场进行反演。该雷达有 PPI、RHI、扇扫、体扫、自定义扫描等多种扫描模式, 在非降水条件下, 水平探测范围可达 10 km, 垂直探测范围 3 km, 数据刷新率 1 s~10 min, 能提供水平风场、垂直风场、下滑道风场等的实时三维监测, 并利用算法对风切变进行识别与告警, 具有响应快、精度高、空间分辨率高、环境适应性强等特点。有降水时, 雷达的探测距离会大大减小。

各类探测数据均存在优势与不足, 仅运用单一数据源难以满足准确识别风切变、尽早发布预警的需求。因此, 需融合多源资料实现数据间的相互补充与验证, 在协同保障中发挥重要价值。

3. 低空风切变的识别与预报应用

3.1. 风切变统计特征

分析 2021 年 12 月~2026 年 4 月机场接收的风切变话音方式航空器空中报告(图 1), 除 8 月外, 其余月份均有风切变事件发生, 其中, 2 月次数最多(24 次), 占比达到 36.9%, 其次为 3 月(13 次)、4 月(12 次), 各占比 20.0%、18.5%。可见, 冬末春初是机场风切变的频发时段, 主要是由于该时期冷暖空气活动频繁, 伴随显著的气温波动, 大气层结稳定性降低, 强对流天气多发, 共同构成有利于风切变发生的气象条件。

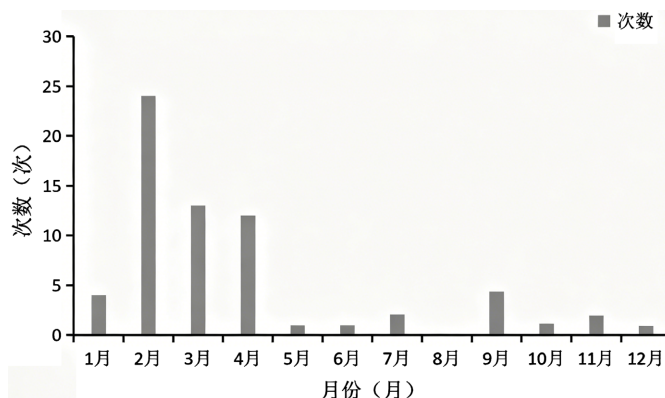


Figure 1. Number of aerial reports by aircraft using wind shear voice method for each month from December 2021 to April 2026

图 1. 2021 年 12 月~2026 年 4 月各月风切变语音方式航空器空中报告次数

统计结果显示,在贵阳机场,飞机起飞时共遭遇风切变 16 次,而降落时遭遇风切变次数远高于起飞阶段,为 49 次。从遭遇风切变的高度来看(表 1),600 m 以下共发生风切变 56 次(占比 86.2%),其中 100~200 m 遭遇次数最多,为 17 次,500~600 m 次数最少,为 2 次。可见,飞机遭遇的风切变集中于近地面层,高度低,且在降落过程中呈高发态势,对飞行安全构成严重威胁。

Table 1. Distribution of wind shear height

表 1. 风切变高度分布

高度(m)	<100	100~200	200~300	300~400	400~500	500~600	>600
次数(次)	9	17	6	15	7	2	9

通过对机场风切变个例的研究发现,其成因主要为受锋面、雷暴、低空急流、辐射逆温、等的影响[13][14]。下文将依据风切变的成因,融合多源探测资料,综合分析其识别效果,并探讨预报应用研究价值。

3.2. 锋面型风切变识别

2026 年 1 月 19 日 21:09、21:11 连续 2 架航班在 01 号跑道五边遭遇风切变后复飞,高度分别为 60 m、311 m。分析环流形势,19 日夜间贵州中部受低空切变线过境影响,配合高空锋区后部冷平流南下,且地面锋面特征明显,属于一次典型的由急行冷锋引发的风切变过程。

EC 数值预报产品提前 24 h 对冷锋影响贵州中部的时段做出有效提示。在短临预报阶段,结合全省自动站 10 m 风的实时数据(图 2(a)),发现 14:00 贵州中北部有地面辐合线存在。锋面影响初期未伴随降水,激光雷达能探测到 8~10 km 范围内的水平风分布情况,19:37 的 PPI (0°)图上,雷达在机场以北约 9 km 处开始捕捉到风向转换信号(图略),预报员随即发布风切变警报,20:29 雷达触发中度风切变告警(图 2(b)),30 min 后第一架飞机遭遇风切变。机场自观同步记录到跑道风向由南转北、北风风速增大情况(图 2(c))。风廓线雷达于 21:18 探测到近地面风向突变(图 2(d)),偏北风随时间由低层逐渐向上扩展,冷空气呈楔形侵入影响机场。随着辐合线南压移出机场区域,后续航班未再遭遇风切变,风切变过程结束。

此次过程中,数值预报提前预判环流变化,为短临预报提供背景场支撑;地面自动站追踪地面辐合线的动态变化,起到早期识别风切变的作用;激光雷达提前 30 min 发出告警,发挥了关键的风切变预警

作用；风廓线雷达全程监测冷空气过境，为预警解除提供重要依据。多源数据的应用，共同构成完整的监测预警闭环。

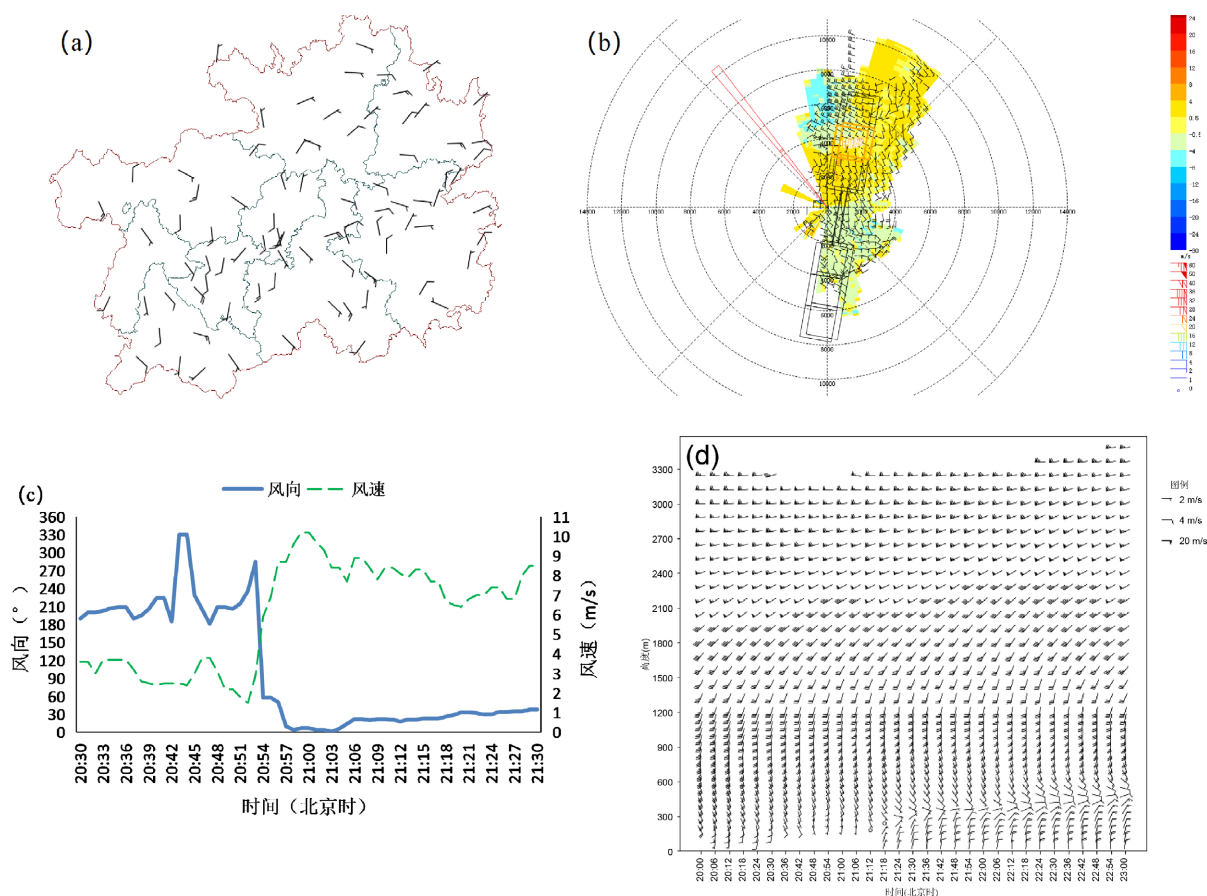


Figure 2. Provincial automatic station 10 m wind direction and speed (a), LiDAR PPI (0°) wind direction and speed (b), airport self observed wind direction and speed (c), wind profile radar vertical wind evolution (d)

图 2. 全省自动站 10 m 风向风速(a)、激光雷达 PPI (0°)风向风速(b)、机场自观风向风速(c)、风廓线雷达垂直风演变(d)

3.3. 雷暴外流型风切变识别

2026 年 3 月 23 日 15:47 有飞机在 01 号跑道五边高度 461 m 处报告遭遇风切变。受高空槽及低空切变线过境影响，15 时左右机场西北方向约 15 km 处开始有多个雷暴单体生成并逐渐合并增强，15:35 雷暴发展强盛时，在天气雷达 1.5° 仰角的反射率因子图上(图 3(a))，回波主体前沿可见一弧形弱回波带影响机场，即雷暴的下沉辐散外流，并引发风切变。激光雷达 PPI (3°)在机场以北 5~6 km 处监测到 12 m/s 的大风(图 3(b))，大风区向南快速移动，约 30 min 后影响机场。风廓线雷达在 15:30 后探测到机场 600 m 以下风向突变，风速骤增(图 3(c))，与冷空气楔形扩展方式不同，雷暴外流形成了垂直厚度一致的近地面强风层，随即有飞机遭遇风切变。机场自观监测到 14:54 跑道风向开始由南转北(图 3(d))，风速逐渐增大，在风切变报告前约 10 min 增至最大。随着雷暴大风区过境，风切变过程结束。

前期预报聚焦于辐合线过境引发的风切变，虽提前发布了预警，但未充分考虑雷暴外流带来的后续影响。此次过程中，天气雷达精准识别了雷暴下沉辐散外流；激光雷达凭借高时间分辨率监测，锁定并追踪大风区；风廓线雷达探测到雷暴外流的垂直结构，为风切变成因分析提供关键依据，并辅助预警的

修订；地面自动站捕捉到风速增大趋势，监测大风区过境情况。多源数据的协同，实现了风切变的识别、追踪与验证。

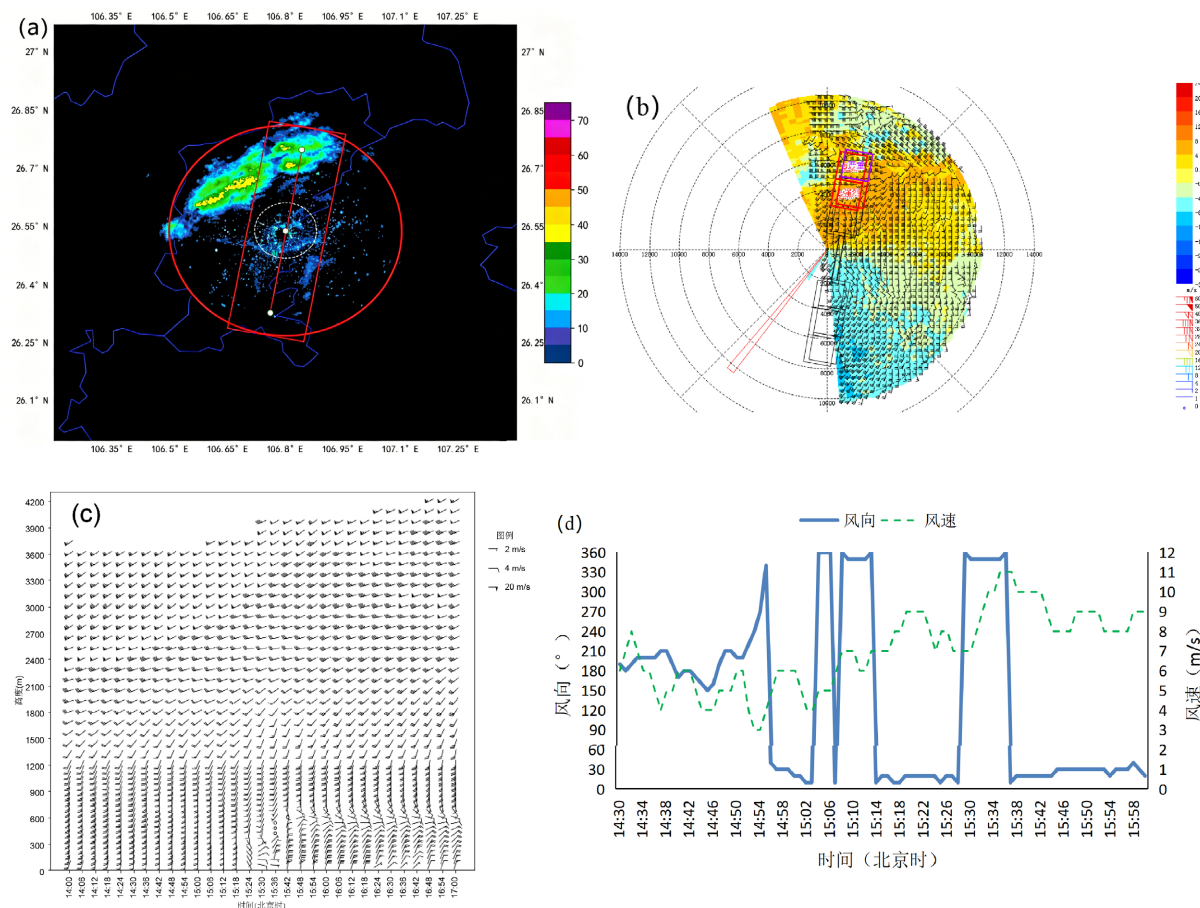


Figure 3. Weather radar 1.5° reflectivity factor (a), laser radar PPI (3°) wind direction and speed (b), wind profile radar vertical wind evolution (c), airport self observed wind direction and speed (d)

图 3. 天气雷达 1.5° 反射率因子(a)、激光雷达 PPI (3°) 风向风速(b)、风廓线雷达垂直风演变(c)、机场自观风向风速(d)

3.4. 动量下传型风切变识别

2026 年 4 月 8 日 16:58 有 1 架飞机在 19 号跑道五边高度 183 m 遭遇风切变复飞。在低空急流持续发展影响下，当日机场上空 700 hPa 风速达 24 m/s，午后湍流交换增强，高空动量下传导致机场地面出现 15 m/s 以上的偏南大风并伴随风切变的发生。

激光雷达 PPI (3°) 显示，午后南风分量由高层逐渐向低层增大，16:26~16:58 期间(图 4(a)~(c))，低层出现风速辐合，雷达识别到风速的剧烈变化，持续告警中度到严重风切变。风廓线图像显示(图 4(d))，自 14:00 起，20 m/s 的西南大风由 1200 m 高度间歇性向下传导至 300 m 高度，机场近地面风速波动剧烈且无规律，最大阵风达到 21.9 m/s，傍晚以后，低层风速才趋于平缓。

可见，晴空背景下大气湍流活动显著，动量下传过程缺乏稳定的演变规律，风切变的发生无特定指征，且不同机型受湍流的影响存在差异，很难实现风切变的精准预警，往往依赖机组的实况报告验证。此阶段激光雷达虚警率高，但可作为风切变发生的有利参考潜势；风速波动剧烈时段，风廓线雷达同样存在风切变指征不突出的问题，待风速波动趋于平缓后，风切变常不再发生，故其探测数据可作为解除

风切变预警的参考依据。

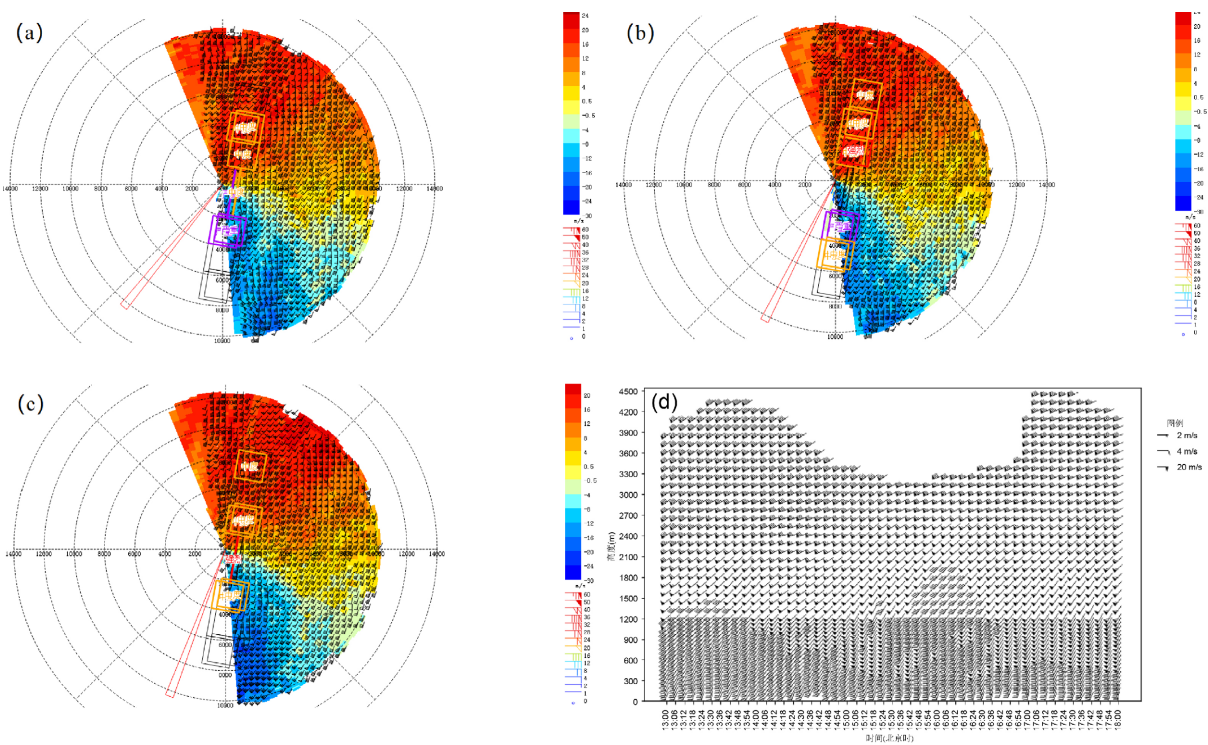


Figure 4. Lidar PPI (3°) 16:26 (a), 16:42 (b), 16:58 (c), Wind direction and speed, wind profile radar vertical wind evolution (d)
图 4. 激光雷达 PPI (3°) 16:26 (a)、16:42 (b)、16:58 (c)、风向风速，风廓线雷达垂直风演变(d)

3.5. 逆温型风切变识别

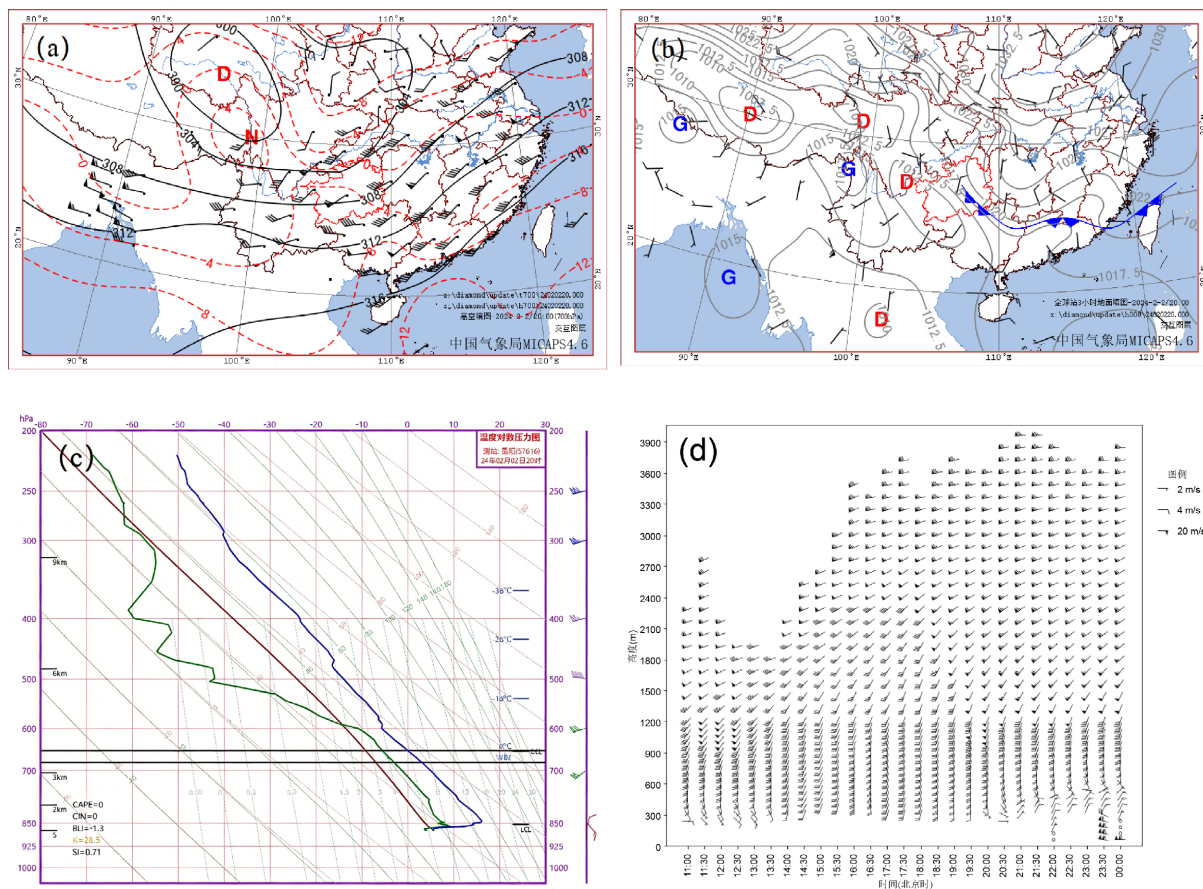
2024 年 2 月 2 日下午至夜间，共计 12 架飞机在起降阶段报告遭遇风切变，刷新机场单日风切变发生次数的历史记录，发生高度低至 35 m，严重制约机场运行效率。由于冷空气的持续补充，机场近地面形成冷垫，其上叠加低空急流，冷垫上有稳定逆温层(图 5(a)~(c))。在地面强北风与中低空强盛西南风长时间对峙的环流背景下，机场垂直方向上的风矢量形成突变，为风切变的发生提供重要条件。

由风廓线雷达的探测结果可清晰看到(图 5(d))，当日下午，机场 300~400 m 高空偏南风的风速由 2~4 m/s 突增到 12~14 m/s，风速剧变导致风切变发生；随着夜间冷空气缓慢渗透，300 m 以上风向开始转换，期间有风机报告风切变，当冷空气层厚度继续增加，风切变层被抬升至 600 m 以上，飞机穿越该层次的高度相对抬升，气流对其造成的扰动影响逐渐降低，风切变过程结束。此次过程中，大气中低层存在稳定逆温层，阻挡了高低空动量交换，风速与风向的切变均从近地面出现并向上扩展，有利于风切变的环境条件长时间维持。

在逆温型风切变中，风廓线雷达发挥了重要的监测作用，对风向与风速切变高度变化的识别，可作为风切变预警发布与解除的重要判据。此次过程中因激光雷达缺乏有效数据，其监测效果尚需后续个例进一步验证。

综上，在不同类型风切变个例的监测中，各探测设备和资料起到不同作用。为实现风切变的精准识别与提前预警，发挥各探测设备的优势，可以采用递进式的预报与服务思路。首依托数值预报模式分析大尺度环流变化，进行风切变的早期潜势识别，划定风险区域；利用多普勒天气雷达、全省地面自动站

数据等,捕捉锋面型、雷暴外流型风切变的触发条件,进行短临预报的修订;临近时段,利用激光雷达进行高时空分辨率的跟踪监测,锁定低空急流、外流边界、风向突变或辐合区等,提前发布关键预警;服务保障期间,风廓线雷达实时监测机场风场垂直结构变化,识别风切变的发生与结束趋势,明确风切变的垂直影响范围,为预警的修订与解除提供重要支撑,形成多源探测资料的协同预警。



图片来源:本研究所使用的中国县级行政界线数据,源于全国 1:100 万地形数据(2015 版),原始数据下载自全国地理信息资源目录服务系统(<https://mulu.tianditu.gov.cn/>)。数据采用 CGCS_2000 国家大地坐标系,经过边界提取与拓扑处理,形成县级行政界线图层。

Figure 5. At 20:00 on February 2, 2024, the 700 hPa situation (a), ground situation (b), Guiyang station sounding (c), and wind profile radar vertical wind evolution (d)

图 5. 2024 年 2 月 2 日 20 时 700 hPa 形势(a)、地面形势(b)、贵阳站探空(c)及风廓线雷达垂直风演变(d)

4. 结论与讨论

(1) 冬末春初,贵阳机场低空风切变高发,且多出现于航空器进近着陆阶段,严重威胁飞行安全。

(2) 贵阳机场构建了多源测风体系,自观系统提供高精度地面数据,风廓线雷达实现单点垂直风场结构高密度监测,激光雷达在非降水条件下具备高频三维风场识别能力,为风切变监测预警提供了多源数据支撑。

(3) 激光雷达对锋面型风切变有约 30 min 预警时效。天气雷达与激光雷达对雷暴外流型风切变的预警修订有辅助作用。激光雷达对动量下传型风切变虚警率高,而风廓线雷达可作为预警解除的参考依据。风廓线雷达数据可作为逆温型风切变预警发布与解除的重要的依据。

(4) 融合多源资料, 构建“数值预报早期识别-天气雷达与地面自观短临修订-激光雷达临近预警-风廓线雷达全程监测”的递进式预报预警思路, 有助于提升风切变的精准识别与预警时效。

(5) 本文获取的风切变样本量相对较少, 且用于分析的个例多集中于典型场景, 研究多以单一因素主导的风切变为前提展开探讨, 这可能导致在应对更为复杂的背景时, 结论的泛化能力存在局限, 研究仍有提升空间。未来有待引入深度学习技术, 进一步探索基于复杂场景下多源探测资料的风切变量化预警阈值, 以提升识别的客观性与实时性。

参考文献

- [1] ICAO (2005) Manual on Low-Level Wind Shear. International Civil Aviation Organization.
- [2] 韩巽. 民航起飞阶段低空风切变对飞行安全的影响[J]. 中国航班, 2023(9): 39-42.
- [3] 王朝霞. 低空风切变对飞机起飞及着陆的影响[J]. 陕西气象, 2001(4): 9-11.
- [4] 王青梅, 郭利乐. 激光雷达在机场低空风切变探测中的应用[J]. 激光与红外, 2012, 42(12): 1324-1328.
- [5] 戴丽莉. 探测微尺度风切变场的多普勒激光雷达研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [6] Hannon, S.M., Thomson, J.A.L., Henderson, S.W., *et al.* (1995) Wind Shear, Turbulence, and Wake Vortex Characterization Using Pulsed Solid State Coherent Lidar. *SPIE Proceedings*, **2464**, 94-102. <https://doi.org/10.1117/12.211480>
- [7] 胡明宝, 肖文建. 风廓线雷达中风切变分析方法的初步研究[J]. 气象科学, 2010, 30(4): 510-515.
- [8] 赵文凯, 单雨龙, 赵世军. 激光测风雷达监测低空风切变研究进展[J]. 气象水文海洋仪器, 2020, 37(4): 97-100, 104.
- [9] 马利柱. 延吉朝阳川国际机场低空风切变成因分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2024(2): 94-96.
- [10] 张洪玮, 吴松华, 尹嘉萍, 等. 基于短距相干测风激光雷达的机场低空风切变观测[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(4): 468-476.
- [11] 古鑫. 机场复杂天气预报预警系统的开发和实现[J]. 科技创新导报, 2021, 18(12): 1-3.
- [12] 罗浩, 张亚男. 边界层风廓线雷达资料在贵阳机场一次强对流天气分析中的应用[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(5): 680-692.
- [13] 张亚男, 罗浩. 贵阳机场低空风切变成因初步分析[J]. 气象科技进展, 2023, 13(2): 58-66.
- [14] 罗娅, 陶勇. 贵阳机场低空风切变特征及影响机制初探[J]. 自然科学, 2024, 12(5): 1121-1129.